

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Zlepšení funkčních parametrů

turbomolekulární vývěvy

**Functional Parameters Improvement of
Turbomolecular Pump**

Student:

Bc. Aleš Pazdera

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Šárka Tichá, Ph.D.

Ostrava 2012

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Aleš Pazdera**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: **Zlepšení funkčních parametrů turbomolekulární vývěvy**
Functional Parameters Improvement of Turbomolecular Pump

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te rozbor požadavků kladených na turbomolekulární vývěvy z hlediska jejich funkčnosti.
2. Proved'te rozbor výhod a nevýhod stávajícího řešení vývěvy.
3. Proved'te návrh změn upraveného typu vývěvy včetně popisu její montáže.
4. Proved'te návrh metodiky měření vibrací a elektromagnetického pole vývěvy.
5. Proved'te praktické ověření navržené metodiky testování včetně vyhodnocení testů.
6. Proved'te celkové zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] HARRIS, Nigel S. *Modern vacuum practice*. - 3rd. ed. Glasgow : Nigel S. Harris, 2005. 457 s.
- [2] ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha : Český normalizační institut, 1996. 32 s.
- [3] ČSN ISO 690-2 *Bibliografické citace - Část 2: Elektronické dokumenty nebo jejich části*. Praha : Český normalizační institut, 2000. 24 s.
- [4] Firemní literatura.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Šárka Tichá, Ph.D.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012



doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 17.5.2012

.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 17.5.2012

.....
Podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Aleš Pazdera

Adresa trvalého pobytu autora práce: Handkeho 755/1b, Olomouc 799 00

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

PAZDERA, A. *Zlepšení funkčních parametrů turbomolekulární vývěvy: diplomová práce.*

Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012, 50 s. Vedoucí práce: Tichá, Š.

Diplomová práce se zabývá zlepšením funkčních parametrů turbomolekulární vývěvy jako je vliv přenášených vibrací a velikosti magnetického pole vývěvy do systému. Teoretická část popisuje princip turbomolekulární vývěvy, vliv vibrací a magnetického pole na systémy u zákazníků včetně návrhů na zlepšení funkčních parametrů. Praktická část popisuje zavedení návrhů do praxe včetně výroby testovacích zařízení a ověření jejich funkčnosti. Na závěr je provedeno celkové zhodnocení navržených a zavedených návrhů na zlepšení.

ANNOTATION OF GRADUATION THESIS

PAZDERA, A. *Functional Parameters Improvement of Turbomolecular Pump: Graduation thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Working and Assembly, 2012, 50 p. Thesis head: Tichá, Š.

This thesis deals with the potential improvement of functional parameters within the turbomolecular pump. Such parameters involve vibrations that are being transmitted, as well as the pump's magnetic field into the system. The theoretical part describes the main principle of such turbo-molecular pump, its vibration and magnetic field's output onto the customers' systems. It also focuses on the suggestions of possible improvement in these given parameters. In the practical part, these suggestions are put into practice. It also looks closely at the testing systems' production and their functionality reinforcement. In the end, the overall evaluation of these proposed and introduced actions is carried out thoroughly.

OBSAH

1	PRINCIP A POUŽITÍ TURBOMOLEKULÁRNÍ VÝVĚVY	10
1.1	Princip a použití	10
1.2	Použití vývěv pro mikroskopy	12
1.3	Požadavky na vývěvy pro elektronové mikroskopy	14
1.3.1	Vakuum	14
1.3.2	Konstrukce a parametry vývěvy	15
1.3.3	Vibrace	16
1.3.4	Magnetické pole	19
2	NÁVRH INOVAČNÍCH ZMĚN SNIŽUJÍCÍCH VIBRACE A VLIV MAGNETICKÉHO POLE	21
2.1	Stanovení interních parametrů	21
2.2	Ložiskové uložení	23
2.3	Magnetické pole	25
2.4	Vyvažování rotoru	26
3	NÁVRH METODIKY VYVAŽOVÁNÍ, MĚŘENÍ VIBRACÍ A MAGNETICKÉHO POLE VÝVĚVY	27
3.1	Uchycení vývěvy	27
3.2	Stanice pro vysokorychlostní vyvažování	28
3.3	Stanice pro sestavení magnetů	30
3.4	Stanice pro měření vibrací a magnetického pole	30
3.5	Měření vibrací	30
3.6	Měření magnetického pole	32
3.7	Hlučnost vývěvy	34
4	OVĚŘENÍ NAVRŽENÉ METODIKY TESTOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ TESTŮ	38
4.1	Vysokorychlostní vyvažování	38
4.2	Testování vibrací	39
4.3	Testování velikosti magnetického pole	41
4.4	Testování hlučnosti vývěv	43
5	CELKOVÉ ZHODNOCENÍ	46
	ZÁVĚR	48
	SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ	49
	SEZNAM PŘÍLOH	50

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

B	Zbytkový magnetismus	[T]
CMSD	Compact Metal Spring Damper (Kompaktní kovový pružinový tlumič)	
FFT	Fast Fourier Transformation (Rychlá Fourierova transformace)	
HSB	High Speed Balance (vysokorychlostní vyvažování)	
ISO100	Velikost příruby dle standardu	
LCMSD	Compact Metal Spring Damper (Kompaktní kovový pružinový tlumič)	
LED	Light-emitting diode (dioda vyzařující světlo)	
L_p	Akustický tlak	[dB]
M	Utahovací moment	[N.mm ⁻¹]
P	Jmenovitý výkon	[W]
PCB	Společnost vyrábějící měřicí zařízení	
R_m	Mez pevnosti materiálu	[MPa]
SEM	Řádkovací elektronový mikroskop	
Si_3N_4	Nitrid křemíku – materiál na výrobu keramických kuliček do ložisek	
$SmCo_5$	Samarium Kobalt – materiál pro výrobu permanentních magnetů	
SPL	Sound Pressure Level (hodnota akustického tlaku)	
TDS	Kód pro označení montážního přípravku	
TEM	Transmisní elektronový mikroskop	
a	Zrychlení	[mm.s ⁻²]
f	Frekvence	[Hz]
p	Tlak	[Pa]
pk	Peak (nejvyšší naměřená hodnota zrychlení)	[mm.s ⁻²]
m	Hmotnost	[kg]
n	Jmenovitý počet otáček	[min ⁻¹]
nEXT240D	Typ turbomolekulární vývěvy	
nEXT240iDL	Nízkovibrační turbomolekulární vývěva	
rms	Střední hodnota zrychlení	[mm.s ⁻²]
v	Rychlost	[m.s ⁻¹]

ÚVOD

Společnost Edwards je světovou jedničkou v oboru výroby a dodávky vakuových vývěv a systémů pro použití v těch nejvyspělejších oborech včetně solárních technologií, polovodičového průmyslu, vědeckého zkoumání, zařízení LED, léčiv a metalurgie. Společnost byla založena v roce 1919 a dodnes nabízí svým zákazníkům kvalitní vakuovou techniku. Má pobočky po celém světě, z nichž největší jsou umístěny v Lutíně (ČR), Chunanu (Jižní Korea), Yachiyo (Japonsko) a samozřejmě v mateřské Velké Británii (více poboček včetně sídla společnosti).

Produkty a technologie

Společnost vyrábí řadu produktů pro čerpání různých plynů včetně nebezpečných. Proto také například společnost vyvinula systémové zařízení na likvidaci těchto nebezpečných plynů.



Suchá spirálová vývěva XDS



Turbovývěva STP Maglev



Inteligentní suchá vývěva iXH



Suchá chemická vývěva CDX

Společnost disponuje vývojovými odděleními, kde se týmy v laboratořích specializují na vývoj nových produktů či zlepšení stávajících, vlastní speciální laboratorní zařízení na testování produktů a také disponuje sítí servisních středisek po celém světě.

Cíl práce

Cílem práce je ověření vlivu navržených konstrukčních změn na snížení vibrací a vlivu magnetického pole turbomolekulární vývěvy na výsledný obraz u elektronových mikroskopů.

Tohoto cíle bude dosaženo splněním těchto úkolů:

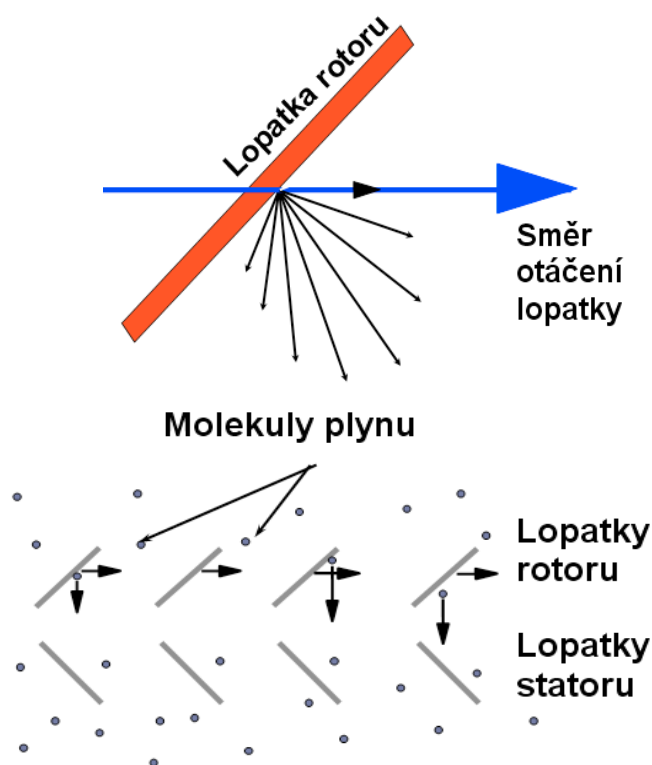
- a) Popisem návrhu konstrukčních změn ložiskových uložení
- b) Zavedením inovačních změn do praxe
- c) Testováním ověřit všechny zavedené změny ovlivňující výsledné parametry vývěvy
- d) Celkovým zhodnocením zavedených změn

1 PRINCIP A POUŽITÍ TURBOMOLEKULÁRNÍ VÝVĚVY

V této kapitole je popsán princip turbomolekulární vývěvy, její hlavní funkční části a parametry, její použití a hlavní oblasti pro zlepšení.

1.1 Princip a použití

Princip molekulární vývěvy je znám už od roku 1913, kdy se začal používat systém rotorů a statorů k čerpání plynů. Otáčející se rotor strhával molekuly plynu nerovnostmi svého povrchu při velkém kompresním tlaku. V roce 1958 byl vynalezen princip turbomolekulární vývěvy, kdy byly použity znalosti a principy z molekulární vývěvy. Do vývěvy byl přidán modifikovaný rotor s lopatkami - rotorové lopatky odrážejí molekuly plynu ve směru čerpání na statorové lopatky, které je zase odráží na další stupeň lopatek rotoru atd. – obr. 1.



Obr. 1: Princip odrážení molekul plynu

Postupem času se tyto vývěvy vlivem větších technických znalostí a dostupných technologií začaly vylepšovat do dnešní podoby, kdy se např. používají magnetická či

keramické ložiska, materiály lepších vlastností, speciální vyvažování, možnosti paralelního připojení do systému, atd. – obr. 2.



Obr. 2: Turbomolekulární vývěva [5]

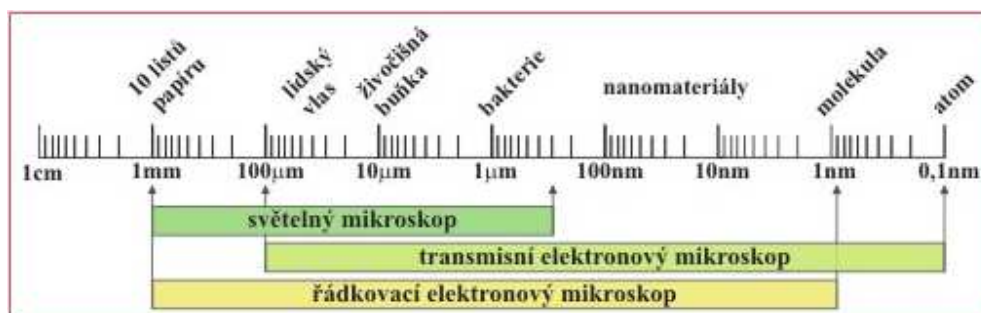
Turbomolekulární vývěva nemůže pracovat při atmosférickém tlaku, protože lopatky rotoru by se při plné rychlosti $n = 60000 \text{ min}^{-1}$ silným třením o čerpaný plyn zahřály a zničily, proto je před ní v systému umístěna primární vývěva (rotační suchá nebo olejová vývěva). Turbomolekulární vývěva je také nazývána jako sekundární vývěva. Primární vývěva nejdříve vyčerpá prostor na tlak $p < 1 \text{ mbar}$ (100 Pa), teprve poté se rozeběhne sekundární vývěva. Tyto vývěvy všeobecně mohou dosáhnout vakua $p < 10^{-10} \text{ mbar}$ (10^{-8} Pa), což je označováno jako ultravysoké vakuum.

Turbomolekulární vývěvy se používají hlavně do celé řady spektroskopických zařízení, elektronových mikroskopů, detektorů netěsností a urychlovačů částic.

1.2 Použití vývěv pro mikroskopy

Vývoj v posledních letech vytváří požadavky na speciální vlastnosti turbomolekulárních vývěv zejména v oblasti elektronové mikroskopie. Jelikož se dostáváme k čím dál širší použitelnosti nanotechnologií, je nutné také používat zařízení, které dokáže do mikro a nanosvěta nahlédnout a k tomu slouží elektronové mikroskopy. Tyto přístroje se používají zejména v materiálovém výzkumu a v biologických laboratořích a mohou nám poskytnout detailní informace o vzorku jako např. mikrostruktuře, krystalografii, chemickém složení a dalších vlastnostech vzorku.

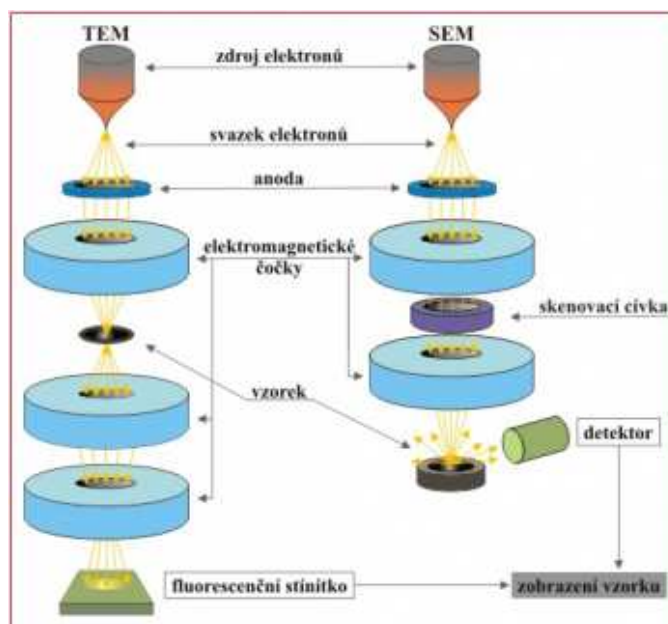
Elektronové mikroskopy jsou optické přístroje, které používají elektrickým polem urychlené elektrony k zobrazení vlastností vzorku. Elektronový mikroskop má oproti optickému mikroskopu daleko vyšší rozlišovací schopnost, jelikož má podstatně kratší vlnovou délku $\lambda = (0,01 - 0,001) \text{ nm}$ než má viditelné světlo $\lambda = (400 - 700) \text{ nm}$ – obr. 3. [2]



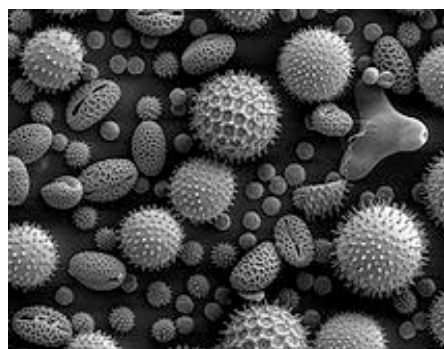
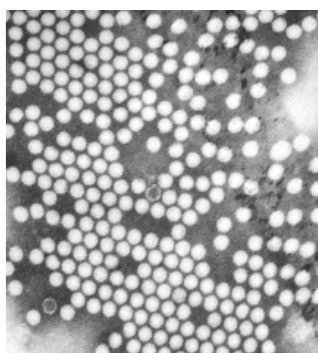
Obr. 3: Typická velikost objektů, které lze pozorovat mikroskopy [2]

Elektronové mikroskopy se rozdělují v podstatě na dva druhy (obr. 4 a obr. 5):

- transmisní elektronový mikroskop (TEM)
- řádkovací elektronový mikroskop (SEM)



Obr. 4: Porovnání principu TEM a SEM [2]



Obr. 5: Výsledný obraz z mikroskopu
 TEM obraz – virus obrny [3] SEM obraz – pylové zrno [4]

Elektronový paprsek vzniká v elektronovém dělu, poté je usměrňován soustavou čoček a clon ke vzorku. Aby mohl paprsek účinně dopadnout na vzorek v požadovaném směru a nerozptýlený, je nutné zajistit, aby se elektrony nesrážely s jinými částicemi. Proto je nutné komoru mikroskopu odčerpat na určitou hodnotu vakua - $p < 10^{-4}$ mbar (10^{-2} Pa). Pro zajištění dostatečné hodnoty vakua se používá turbomolekulární vývěva v kombinaci s primární vakuovou vývěvou.

1.3 Požadavky na vývěvy pro elektronové mikroskopy

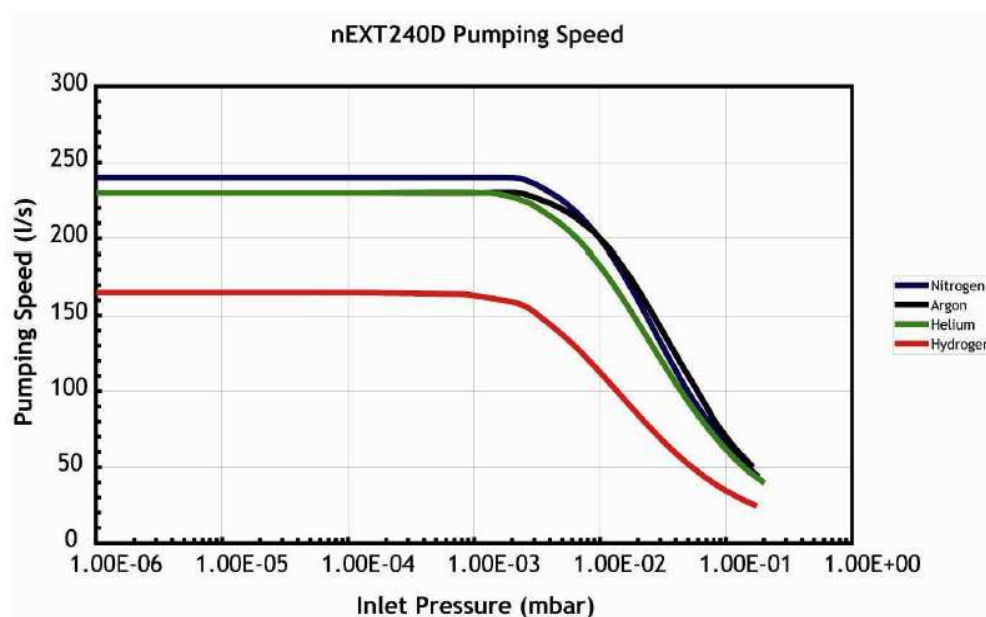
1.3.1 Vakuum

Vakuum je definováno jako prostor, kde tlak plynů a par je menší než při atmosférickém tlaku (většinou podstatně menší). Hodnota vakua se uvádí v jednotkách tlaku – Pa (mbar, torr). Pro vakuové vývěvy se nejčastěji uvádí hodnota vakua v mbar, popř. v Pa (na americkém kontinentu torr).

Vakuum se rozděluje do několika kategorií:

- Hrubé vakuum – $p = 1$ až 10^{-3} mbar (100 až 10^{-1} Pa) - pístové vývěvy,
- Střední vakuum – $p = 10^{-3}$ až 10^{-5} mbar (10^{-1} až 10^{-3} Pa) – rotační, scrollové vývěvy,
- Vysoké vakuum – $p = 10^{-5}$ až 10^{-8} mbar (10^{-3} až 10^{-5} Pa) – difuzní vývěvy,
- Ultravysoké vakuum – $p < 10^{-8}$ mbar (10^{-5} Pa) - turbomolekulární, kryogenní vývěvy.

Základem pro vytvoření ultravysokého vakua, je čistota čerpaného prostoru i samotné vývěvy. Pokud je například vývěva kontaminována uhlovodíky (obsah olejů), nemusí být schopná odčerpat tyto molekuly uhlovodíku a dosáhnout požadované hodnoty vakua ani po delším čase provozu. Jelikož průměrná rychlost molekul vodíku je $v = 1900 \text{ m.s}^{-1}$ (patří mezi lehké plyny), lze ho hůře odčerpávat, jelikož pro lopatky rotoru je obtížnější tyto molekuly zasáhnout a odrazit (pro porovnání průměrná rychlost molekul dusíku je $v = 236 \text{ m.s}^{-1}$) a zvětšuje možnost zpětné difuze plynu [1] – obr. 6. Z důvodu zachování čistoty dílů vývěvy se montáž vývěv provádí v čistém prostoru, kam díly vstupují po umytí v ultrazvukové myčce. Samotná montáž se provádí ve speciálních pracovních ochranných oblecích, v rukavicích a jsou používány jen materiály určené pro práci v čistých prostorech, aby nedošlo byt' k sebemenší kontaminaci dílů.



Obr. 6: Čerpací rychlost plynů pro nEXT240D [5]

1.3.2 Konstrukce a parametry vývěvy

Turbomolekulární vývěvy používané pro všechny ostatní systémy jsou označovány jako nEXT240D. Vývěvy používané do elektronových mikroskopů jsou nově označovány jako nEXT240iDL, což jsou vývěvy bez regenerativního stupně s výstupem na mezistupňové čerpání – tab. 1., obr. 7.

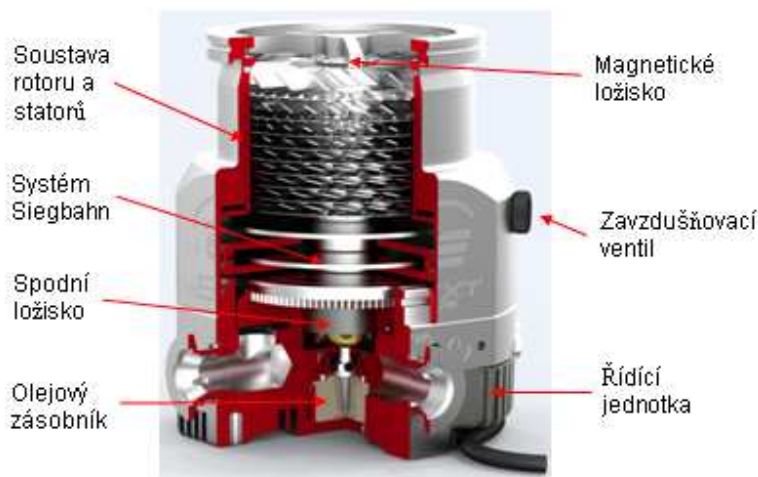
Tab. 1 – Technické parametry nEXT240 [5]

Parametr	nEXT240D ISO100	nEXT240D CF100
Hmotnost	5.7kg	8.8kg
Vstupní příruba	ISO100	100CF
Výstupní příruba	25NW	25NW
Rychlost čerpání na vstupu [m ³ .s ⁻¹]		
N ₂	0,24	0,24
He	0,23	0,23
H ₂	0,165	0,165
Vstupní kompresní poměr		
N ₂	> 1 x 10 ¹¹	> 1 x 10 ¹¹
He	3 x 10 ⁵	3 x 10 ⁵
H ₂	1 x 10 ⁴	1 x 10 ⁴
Konečný tlak	< 6 x 10 ⁻⁸ mbar	< 5 x 10 ⁻¹⁰ mbar

Tyto vývěvy mají jmenovitý počet otáček $n = 60000 \text{ min}^{-1}$ a volitelný výkon $P = 50\text{-}200 \text{ W}$ (4-pólový motor) při maximální hladině hluku 45 dB (A).

Hlavní části vývěvy [6]:

- spodní ložisko – keramické kuličky, uložené v těle vývěvy přes speciální tlumič
- horní ložisko – magnetické
- rotor – soustava lopatek na hřídeli, vyvažovaný
- Siegbahn – soustava unášecích stupňů k dosažení vyšších kompresních poměrů
- zásobník oleje – maže spodní ložisko
- řídicí jednotka – ovládá vývěvu, ukládá historii, servis



Obr. 7: Turbomolekulární vývěva – hlavní části [5]

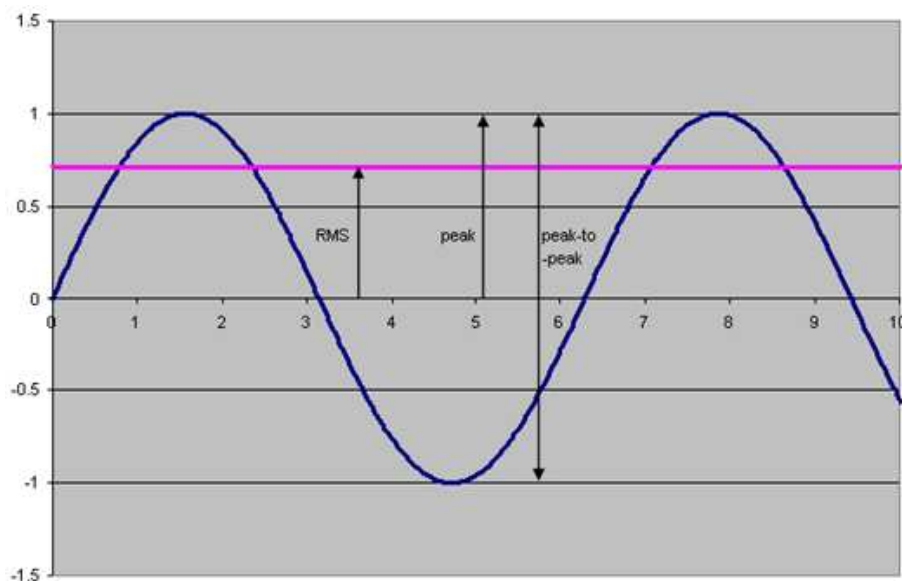
Jelikož jsou elektronové mikroskopy velice citlivé na vibrace a magnetické pole, které ovlivňují výsledný obraz vzorku pod mikroskopem, z hlediska konstrukce vývěvy je pro ně zásadní vyvážení rotoru a jeho uložení v ložiscích. Navíc magnetické ložisko (soustava magnetů) musí mít co nejmenší vnější magnetické pole.

1.3.3 Vibrace

Vibrace jsou produkovány mnoha zdroji. Jestliže nějaký zdroj vytváří vibrační frekvence, které jsou stejné nebo blízko rezonanční frekvenci dílu, tento díl bude rezonovat. Dokonce vibrace velice dobře vyváženého dílu mohou být zvýšeny konstrukcí sestavy, v které jsou uloženy. Vibrace se nezvyšují jen s otáčkami, ale zvyšují se náhle (špičky), když prochází

frekvencí “odpovídajícího“ dílu. Výsledkem toho jsou vibrace z ložisek, nevyváženého rotoru, nesprávné montáže, motoru, převodovky, atd. [6]. Vibrace popisujeme jako zrychlení a [mm.s^{-2}] popř. [mg], a buď jako hodnotu rms (střední hodnota) nebo peak (nejvyšší naměřená hodnota) – obr. 8. Převod z peak na rms:

$$\text{rms} = \text{peak} \times \frac{1}{\sqrt{2}}$$



Obr. 8: Vztah peak - rms u sinusoidy

Ve většině systémů jsou vibrace nežádoucí a nejinak je tomu u elektronových mikroskopů. Nadměrné vibrace způsobují chvění obrazu a tím také jeho rozostření. U vývěv nEXT240iDL jsou původci největších vibrací rotor a ložiska.

Rotor - jelikož rotor při plné rychlosti má otáčky $n = 60000 \text{ min}^{-1}$, vyvážení rotoru je základem pro co nejnížší nevyvážení, která způsobuje vibrace. Rotor se vyvažuje ve dvou rovinách stavěcími šrouby různých hmotností v mg – obr. 9, a provádí se na balancovacím stroji se zadanou maximální hodnotou nevyvážení. Pokud není rotor dobře vyvážený, ukáže se nám špička na frekvenci $f = 1000 \text{ Hz}$ dle vztahu

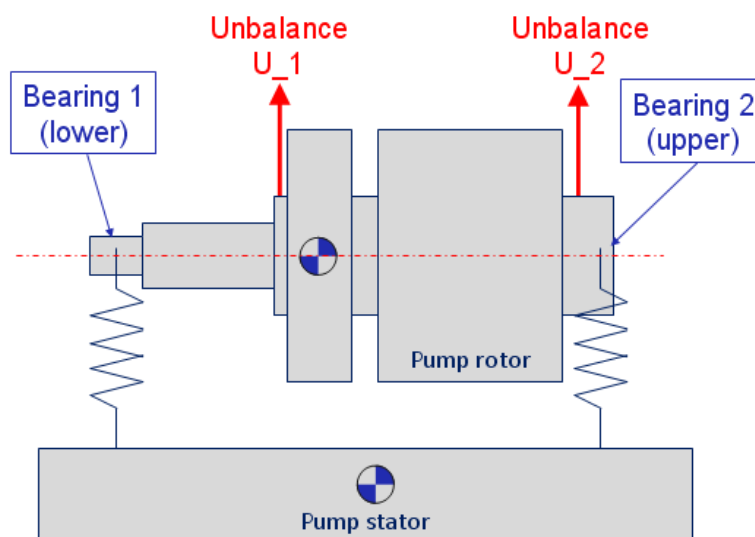
$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

kde:

f.....frekvence [Hz]

ωúhlová rychlost [rad.s^{-1}]

πmatematická konstanta

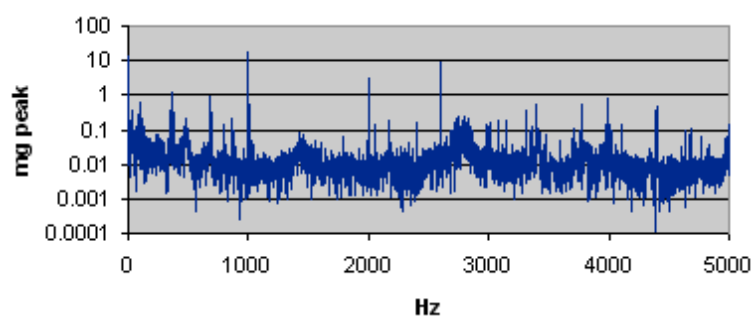


Obr. 9: Uložení rotoru [5]

Ložiska - spodní ložisko je složeno z vnitřního a vnějšího kroužku, klece a keramických kuliček. Keramické kuličky jsou vyrobeny z materiálu Si_3N_4 (nitrid křemíku) a vyvíjejí menší odstředivé síly na kuličkové vedení než ocelové kuličky. Jsou také tvrdší a tepelně odolnější, čímž minimalizují opotřebení vedení kuliček. Jejich hladký povrch vede k menšímu tření a tím také k delší životnosti. Ložisko je mazáno lubrikantem, který zajišťuje chlazení ložiska a dobré mazací vlastnosti. Nejdůležitější pro správný chod ložiska je jeho čistota. Pokud se dostane nečistota mezi kuličky a kroužky, je pravděpodobné, že tato nečistota způsobí povrchové vady v kuličkové dráze na kroužcích, popř. v kleci ložiska. Potom nejenže klesá životnost ložiska, ale je to zdroj vibrací, který musíme eliminovat.

Horní ložisko je magnetické, což má za následek snížení vibrací, nulové tření, delší životnost a zabránění kontaminace vývěvy uhlovodíky z maziv v oblasti ultravysokého vakua.

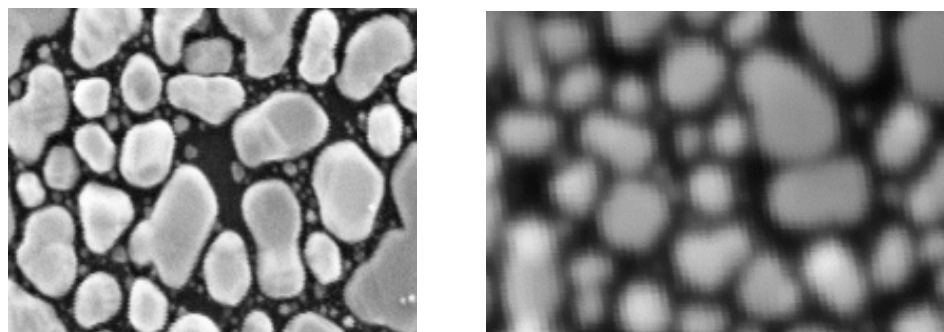
Jelikož každá část vývěvy má různou frekvenci, můžeme identifikovat případný zdroj vibrací změřením frekvencí. Pro měření frekvencí se používá software National Instrument (NI), který v kombinaci s akcelerometry převádí výsledky měření do FFT – Rychlé Fourierovi transformace – obr. 10.



Obr. 10: Příklad FFT

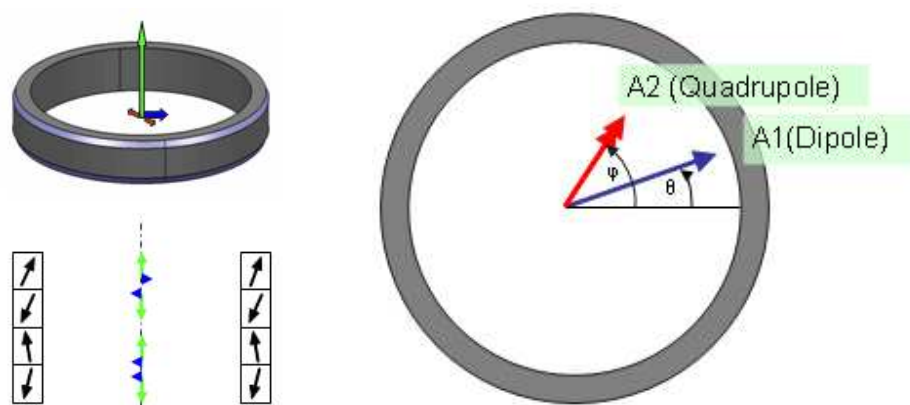
1.3.4 Magnetické pole

Magnetické pole je u turbomolekulárních vývěv vytvářeno motorem a magnetickým ložiskem. Právě magnetické ložisko je největším zdrojem magnetického pole. Toto pole negativně ovlivňuje výsledný obraz v elektronovém mikroskopu a projevuje se chvěním obrazu a jeho rozostřením – obr. 11. Velikost magnetického pole se měří v mG (mikro Gaus), popř. nT (nano Tesla).



Obr. 11: Porovnání ostrého a rozostřeného obrazu [5]

Magnetické ložisko je tvořeno čtyřmi vnitřními a čtyřmi vnějšími permanentními magnety vyrobené z materiálu Samarium Kobalt (SmCo_5) – obr. 12, o zbytkovém magnetismu $B = (0,89 - 0,97) \text{ T}$. V ideálním magnetu je polarizace magnetu výhradně v ose. Při jejich výrobě lisováním dochází ovšem k rozptylu polarizace a proto v reálném magnetu je vždy jeho polarizace odkloněná od osy magnetu. Tím vzniká v radiálním směru dipólový moment a v menší míře i kvadrupólový moment. Všeobecně kvadrupólový moment je daleko menší než dipólový.



Obr. 12: Odklonění polarity magnetu

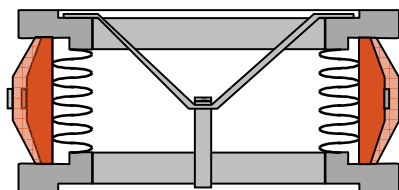
Vzhledem k technologii výroby magnetů, je polarita všech magnetů více či méně odkloněná od své osy.

2 NÁVRH INOVAČNÍCH ZMĚN SNIŽUJÍCÍCH VIBRACE A VLIV MAGNETICKÉHO POLE

V této kapitole je popsáno stanovení maximálních funkčních parametrů, změna konstrukce ložiskového uložení, návrh změn pro snížení vlivu magnetického pole a zavedení vysokorychlostního vyvažování.

2.1 Stanovení interních parametrů

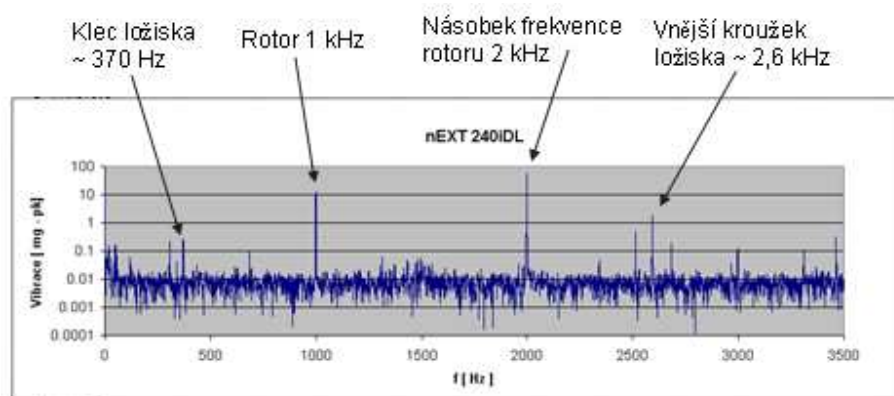
Pro stanovení funkčních parametrů nízkovibračních vývěv pro elektronové mikroskopy je nutno úzce spolupracovat s výrobcí těchto zařízení, jelikož jsou to oni, kteří zjistí nesprávnou funkci mikroskopů nejdříve. Jde především o rušení obrazu magnetickým polem vývěvy nebo nejasný obraz z důvodu přenosu vibrací na zařízení. Jelikož nám výrobci mikroskopů nestanovili žádné maximální parametry pro vývěvy, museli jsme si je na základě zkušeností a zkoušek stanovit sami. Základem pro nás bylo, že mikroskopy jsou citlivé na vibrace ve frekvenčním pásmu $f = (0 - 2000) \text{ Hz}$ - vibrace na vyšších frekvencích absorbuje vibrační izolátor – obr. 13.



Obr. 13: Isolátor vibrací [5]

Parametry vývěv důležité pro správnou funkci mikroskopů:

Vibrace vývěvy přenášené do systému – měří se vibrace v axiálním a radiálním směru na vstupním otvoru na rozsahu frekvencí $f = (0 - 3500) \text{ Hz}$. Tento rozsah byl stanoven na základě vlastních frekvencí dílů vývěvy – obr. 14.



Obr. 14: Špičky na FFT

Magnetické pole – jelikož vývěva je umístěna v určité vzdálenosti od systému (200 mm), je nutné kontrolovat velikost magnetického pole rovněž v této vzdálenosti. Velikost byla stanovena zkouškami a měřením vlivu vývěvy na systém a výsledný obraz přímo u zákazníka. Měření se provádí v radiálním a tangenciálním směru (velikost magnetického pole v axiálním směru je zanedbatelná oproti velikosti magnetického pole v radiálním a tangenciálním směru – zjištěno měřením).

Stanovené a zákazníkem očekávané maximální parametry pro vývěvy používané do systému elektronových mikroskopů – tab. 3 a tab. 4.

Tab. 3 Limity pro vibrace v [mm.s⁻²]

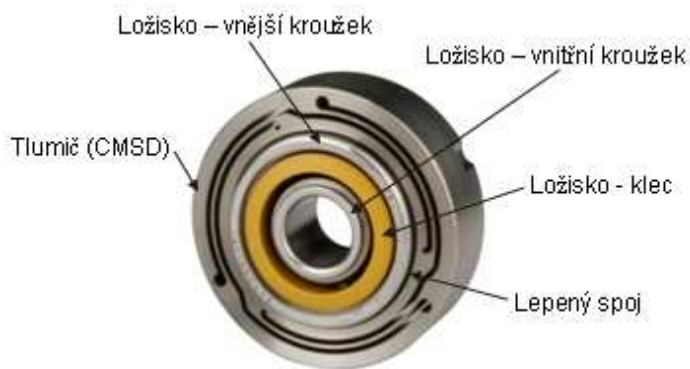
Maximální limity pro vibrace					
Frekvenční rozsah		Radiální směr		Axiální směr	
		Deterministický	Náhodný	Deterministický	Náhodný
40	280	5	5	8	12
280	990	7	10	4	5
990	1900	100	100	100	100

Tab. 4 Limity pro magnetické pole

Maximální limity pro magnetické pole			
Tangenciální směr X	Axiální směr Y	Radiální směr Z	Celkový X + Y + Z
≤ 450 μG - pk	≤ 450 μG - pk	≤ 450 μG - pk	≤ 1150 μG - pk
≤ 45 nT - pk	≤ 45 nT - pk	≤ 45 nT - pk	≤ 115 nT - pk

2.2 Ložiskové uložení

Sestava uložení spodního ložiska je určena jak k přenášení axiálního, tak radiálního zatížení. Je složena z ložiska (vnitřního a vnějšího kroužku, klece, krytu, těsnění a keramických kuliček) a tlumiče vibrací – obr. 15. Uložena je v těle vývěvy přes speciální kompaktní kovový tlumič (CMSD) sloužící k zamezení přenosu vibrací z rotoru na ostatní části vývěvy, čímž by docházelo k vibrování celé soustavy. Tento tlumič pracuje na principu listové pružiny, kdy v těle tlumiče jsou elektroerozivním obráběním vytvořeny 3 drážky tlumící pohyb v radiálním směru a je schopný absorbovat nevyváženost rotoru. Tlumič je velmi tuhý v axiálním směru kvůli dodržení tolerancí mezi rotujícími a pevnými částmi systému rotoru a statoru.



Obr. 15 CMSD sestava

Konstrukce CMSD je chráněna patentem č. US2010215475 (A1) — 2010-08-26 [7].

I když tento systém minimalizuje vibrace přenášené do systému, pro použití v systému elektronového mikroskopu jsou stále nedostačující.

Návrhy změn designu CMSD sestavy snižující přenášení vibrací do systému:

- a) Použití pouze dvoudrážkového LCMSD ke tlumení vibrací – pokud změníme konstrukci tlumiče jen na dvě ramena místo tří, získáme tím delší ramena či drážky, které budou ještě více tlumit přenášené radiální vibrace do systému. Dochází tím také sice k nepatrnému snížení tuhosti LCMSD v radiálním i axiálním směru, které ale neovlivňuje tuhost celého systému – obr. 16.

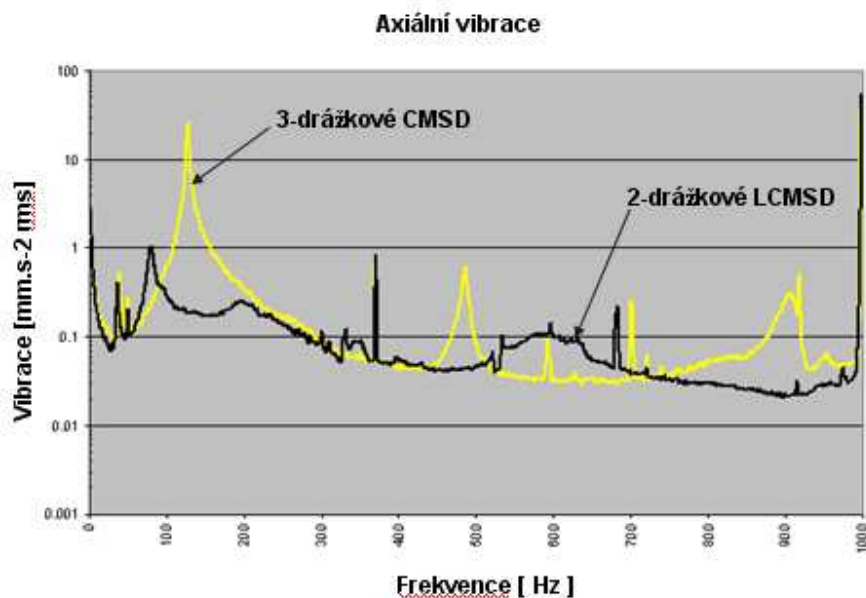
- b) Změna těsnícího O kroužku z bílého silikonu na černý fluorocarbon – materiál fluorocarbon daleko více tlumí vibrace v axiálním směru oproti silikonu na nízkých frekvencích $f = (0 - 250)$ Hz. Jeho nevýhodou je, že lehce zvyšuje přenos vibrací v radiálním směru [5].

Obě tyto změny byly prodiskutovány s výrobcem CMSD sestavy a odsouhlasena změna konstrukce. Byla vyrobena první série 20 kusů na vyzkoušení vlastností sestavy ve vývěvě měření v laboratoři v Anglii.



Obr. 16: Návrh konstrukce LCMSD sestavy

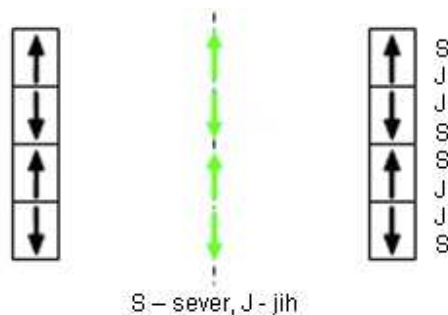
Testováním bylo zjištěno, že 2-drážkové LCMSD přenáší zhruba 8x méně axiálních vibrací do systému než 3-drážkové CMSD – obr. 17.



Obr. 17: Porovnání přenášených vibrací CMSD a LCMSD

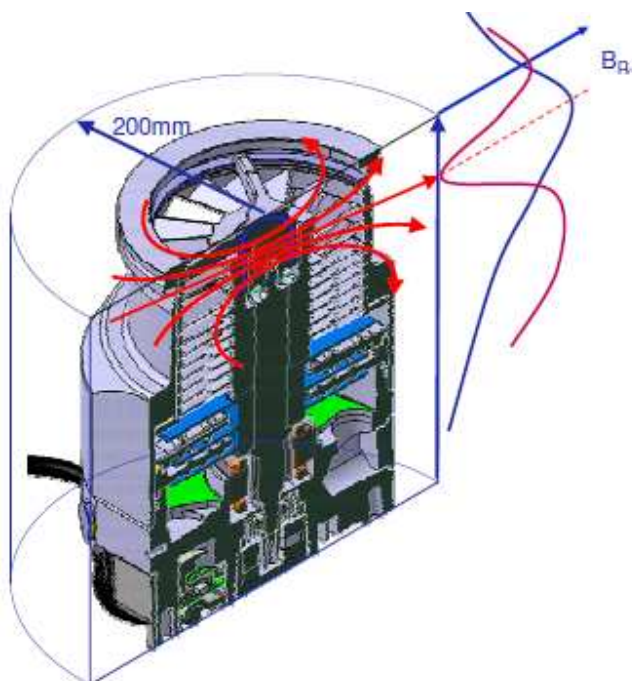
2.3 Magnetické pole

Na standardní vývěvě nEXT240D se 4 vnější magnety lisují do rotoru se vzájemným pootočením vůči sobě tak, aby se odpuzovaly – obr. 18.



Obr. 18: Magnety nalisované do rotoru

Tyto vývěvy jsou používány do aplikací, kde není požadováno měření velikosti magnetického pole a kde magnetické pole vývěvy negativně neovlivňuje chod vakuového systému. Pro vývěvy nEXT240iDL byly stanovené limity velikosti magnetického pole z horního magnetického ložiska v radiálním a tangenciálním směru ve vzdálenosti 200 mm od osy rotace vývěvy – obr. 19.



Obr. 19: Vzdálenost měřené velikosti magnetického pole [5]

Návrhy změn snižující velikost magnetického pole:

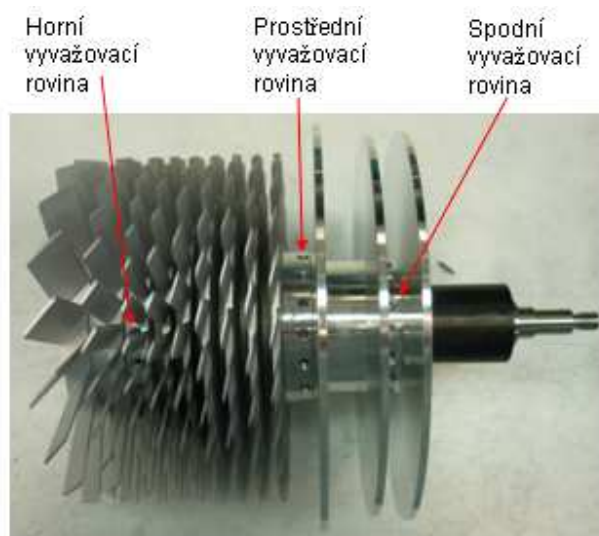
Tato část není součástí diplomové práce. Návrhy změn snižující velikost magnetického pole jsou vyvinuty společností Edwards s.r.o. a jsou brány jako její know-how. Proto jsou technické aspekty těchto změn uvedeny ve zvláštní příloze [12].

2.4 Vyvažování rotoru

Při maximálních otáčkách $n = 60000 \text{ min}^{-1}$ se každá nevyváženost rotoru projevuje zvýšením vibrací v celém systému. Proto je velikost nevyváženosti rotoru kritická z hlediska velikosti vibrací v celém systému.

Návrhy změn z hlediska vyvažování rotoru:

- a) *Vysokorychlostní vyvažování* - rotor vývěvy nEXT240D se vyvažuje ve dvou rovinách, pro nízkovibrační vývěvu je nutné použít i třetí rovinu mezi původními dvěma rovinami k odstranění nevyváženosti pro dosažení minimálních vibrací – obr. 20.



Obr. 20: Vyvažovací roviny

- b) *Nízkorychlostní vyvažování* – snížení limitu nevyváženosti rotoru při nízkorychlostním vyvažování s ohledem na výsledky zkoušek (počet vyvažování, omezení v oblasti konstrukce rotoru).

3 NÁVRH METODIKY VYVAŽOVÁNÍ, MĚŘENÍ VIBRACÍ A MAGNETICKÉHO POLE VÝVĚVY

V této kapitole je popsáno uchycení vývěvy v přípravku pro snížení přenosu vibrací, návrhy testovacích stanic a detailní popis měření vibrací a magnetického pole.

3.1 Uchycení vývěvy

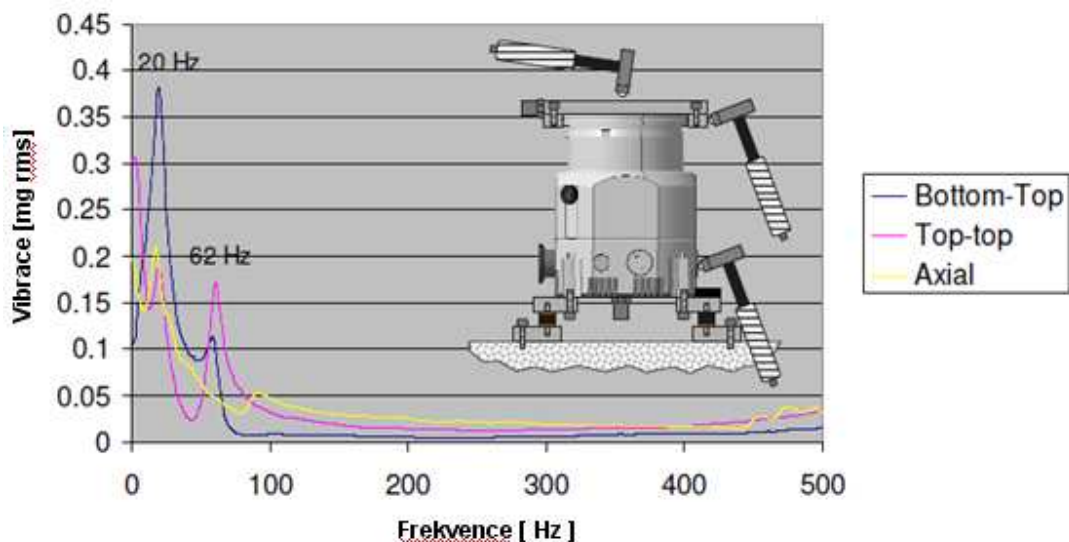
Jelikož vývěva musí být z hlediska bezpečnosti uchycena při testování na testovacím přípravku, je nutné ji připevnit k testovacímu stolu. Tím dochází k přenosu vibrací a ovlivnění výsledků testování. Proto je nutné co nejvíce přenos vibrací utlumit uchycením do přípravku upraveného právě za tímto účelem doplněným o tlumící podložky z pryže – obr. 21.



Obr. 21: Přípravek k uchycení vývěvy pro testování

Vývěva je uchycena v tomto přípravku dvěma šrouby M8 o pevnosti 12.9 ($R_m = 1200$ MPa) po celou dobu testování, tzn. vysokorychlostní vyvažování, celkový test funkčnosti a finální měření vibrací a magnetického pole. V systému pro elektronové mikroskopy je vývěva uchycená za horní přírubu, ale testy bylo dokázáno, že uchycení na přípravek tlumící vibrace neovlivňuje negativně výsledky testů. Je samozřejmě také výhodou, že je možné toto uchycení pro stávající funkční test a není nutné dalších větších finančních investic.

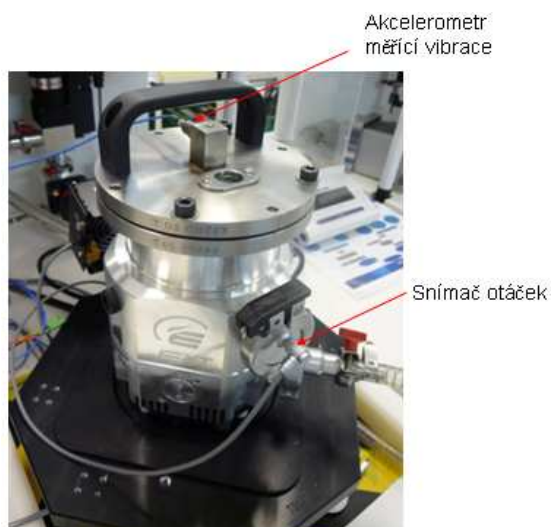
Testováním je ověřeno, že frekvence tohoto přípravku neovlivňuje výsledek měření, tzn. že frekvence vývěvy neodpovídají frekvencím přípravku popř. jeho násobkům – obr. 22.



Obr. 22: Měření frekvencí přípravku

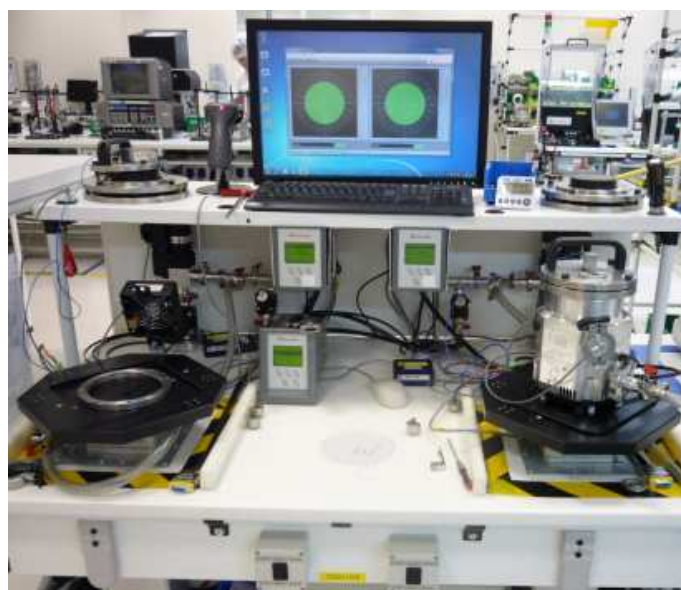
3.2 Stanice pro vysokorychlostní vyvažování

Pro vysokorychlostní vyvažování je použita kombinace signálu z akcelerometru měřící hodnotu vibrací v radiálním směru a snímače otáček ve výstupu pro mezistupňové čerpání – obr. 23. Vývěva je nejdříve 6x spuštěna a zastavena pro ustálení výsledků měření. Při šestém měření jsou signály z obou měření zpracovány softwarem National Instrument, kde výsledné měření ukáže velikost nevyváženosti na třetí vyvažovací rovině. Pro vyvážení se používají stavěcí šrouby vyrobené přesně na určitou hmotnost, např. šroub o hmotnosti $m = 180 \text{ mg}$. Po vložení odpovídajícího stavěcího šroubu (šroubů) jsou zadané hodnoty vloženy do programu, který s nimi poté už kalkuluje. Poté se vývěva znovu spustí a opět se vyhodnocuje nevyváženost při plné rychlosti. Po dosažení maximálního dovoleného limitu nevyváženosti rotoru pro vysokorychlostní testování, se vývěva nechá ustálit při plné rychlosti a měření se opakuje po určitém čase, kde se sleduje pohyb velikosti nevyváženosti rotoru a také směr. Pokud je nevyváženost rotoru stále v limitech, vývěva se zastaví a pokračuje na funkční test.



Obr. 23: Vyvažování rotoru

Z důvodu úzkého místa v testovací sekvenci, je testovací stanice konstruována s dvěma samostatnými testovacími místy pro lepší průchodnost a zamezení úzkých míst ve výrobě – obr. 24. V případě 2 stanic pro vysokorychlostní testování je průchodnost 1 vývěva za hodinu.



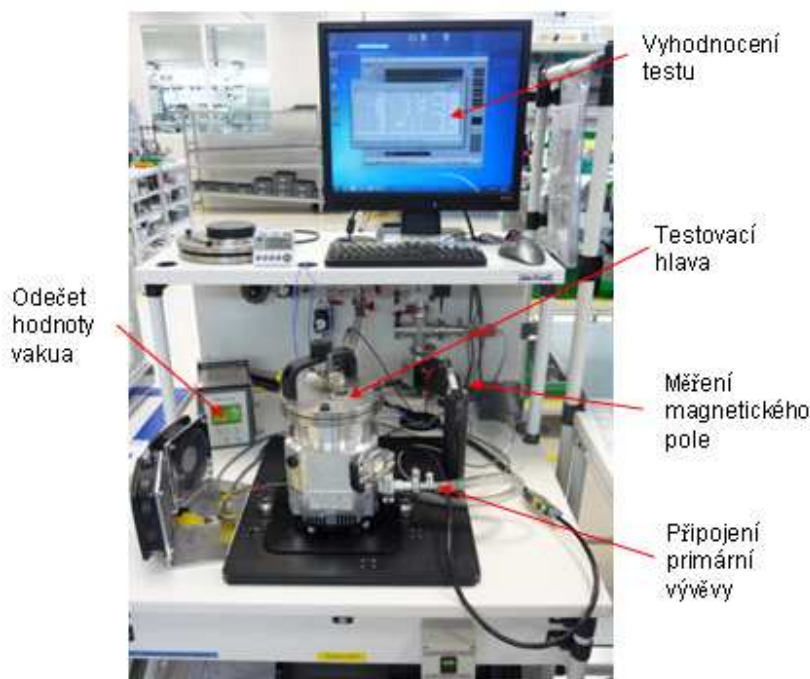
Obr. 24: Vysokorychlostní vyvažování

3.3 Stanice pro sestavení magnetů

Tato část není součástí diplomové práce. Návrh testovací stanice je vyvinut společností Edwards s.r.o. a je brána jako její know-how. Proto jsou technické aspekty těchto změn uvedeny ve zvláštní příloze [12].

3.4 Stanice pro měření vibrací a magnetického pole

Pro měření vibrací a magnetického pole vývěvy bylo rozhodnuto o výrobě jedné testovací stanice pro oba tyto parametry – obr. 25. Jednak proto, že se výsledky měření neovlivňují, jednak proto, že je to levnější a úspornější varianta z hlediska potřebného prostoru a času stráveného testováním vývěvy. Důležité pro samotné měření vibrací je, že testovací stanice musí stát samostatně tak, aby se nedotýkala jiného zařízení, kde hrozí přenos vibrací do měřicího zařízení a ovlivnění výsledků měření.



Obr. 25: Testovací stanice

3.5 Měření vibrací

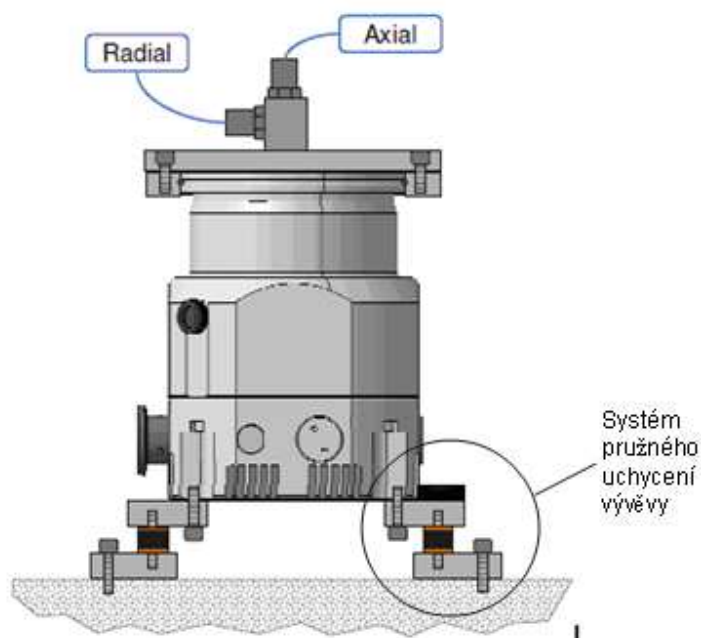
Vibrace se měří na vstupu vývěvy v axiálním a radiálním směru. K měření jsou použity akcelerometry firmy PCB, model 352C34 – obr. 26, o citlivosti 10,2 mV a frekvenčním

rozsahu $f = (0,5 - 10000) \text{ Hz}$ [8]. Tento typ akcelerometrů je dostatečně citlivý pro měření vibrací na nízkovibrační vývěvě.



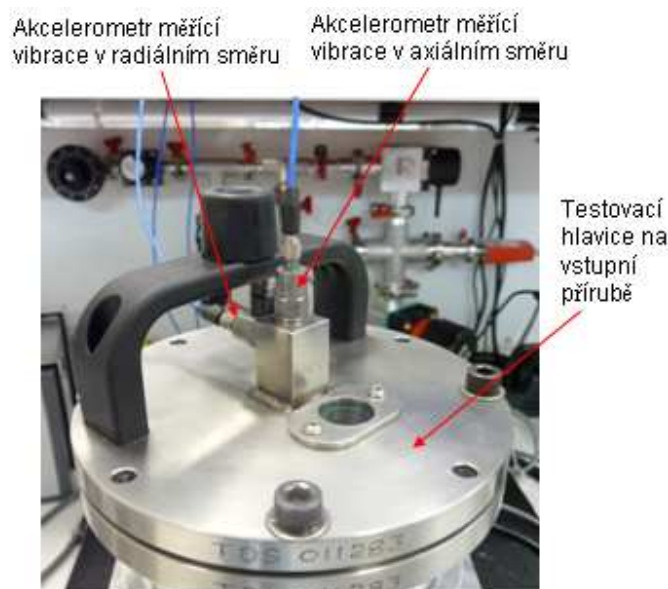
Obr. 26: Detail akcelerometru [8]

Je navržena konstrukce upnutí vývěvy a umístění akcelerometrů pro co nejpřesnější měření vibrací odpovídající upnutí vývěvy ve finálním systému u zákazníka. Vývěva je upnuta do navrženého přípravku pro snížený přenos vibrací, který je uchycený k testovacímu stolu, je namontována testovací hlavice s akcelerometry s připojenými kabely přenášející signál do testovacího softwaru a připojena primární vývěva – obr. 27.



Obr. 27: Návrh konstrukce pro měření vibrací [5]

Akcelerometry jsou umístěny v testovací hlavici TDS 011283 o velikosti ISO100 utažené momentem $M = 1,5 \text{ N.m}^{-1}$. Horní část hlavice je upnutá čtyřmi šrouby M8 utahovacím momentem $M = 8 \text{ N.m}^{-1}$ do spodní části hlavice přes ocelový kroužek – obr. 28.

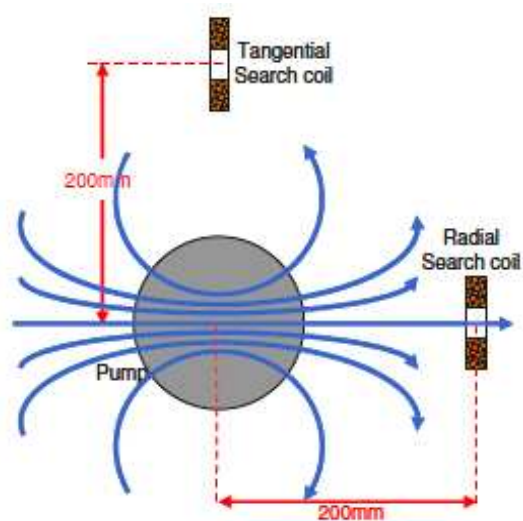


Obr. 28: Pozice akcelerometrů při testování

Signál z akcelerometrů zpracovává software firmy National Instrument s nastavenými maximálními limity pro vibrace v axiálním i radiálním směru.

3.6 Měření magnetického pole

K měření magnetického pole jsou použity cívky pootočené vůči sobě o 90° v radiálním a tangenciálním směru umístěné ve vzdálenosti 200 mm od osy vývěvy – obr. 29. Osa cívky v radiálním směru prochází osou vývěvy, osa cívky pro měření magnetického pole v tangenciálním směru je k ose vývěvy kolmá. Obě cívky jsou umístěny ve výšce magnetického ložiska pro co nejpřesnější měření velikosti magnetického pole.



Obr. 29: Umístění cívek [5]

Vývěva je upnuta do navrženého přípravku pro snížení přenos vibrací, který je uchycený k testovacímu stolu, je namontována testovací hlavice s akcelerometry a připojenými kabely přenášející signál do testovacího softwaru a připojena primární vývěva – obr. 30.



Obr. 30: Rozmístění cívek

Signál z těchto cívek je přenášený kabely do testovacího softwaru National instrument, který vyhodnocuje velikost magnetického pole v obou směrech při nastavení maximálních limitů.

3.7 Hlučnost vývěvy

Pro standardní vývěvu nEXT240D je stanovena maximální hlučnost vývěvy $45 \text{ dB (A)} \pm 3 \text{ dB}$ a tento parametr je nutné ověřit také u nízkovibrační vývěvy. Z důvodu nové konstrukce LCMSD je nutné ověřit, že tato změna neovlivňuje parametr maximální dovolené hlučnosti. Jelikož jsou tyto vývěvy používány většinou v laboratořích nebo z hlediska hlučnosti v klidných prostorech, nesmí být samozřejmě tato hodnota překročena.

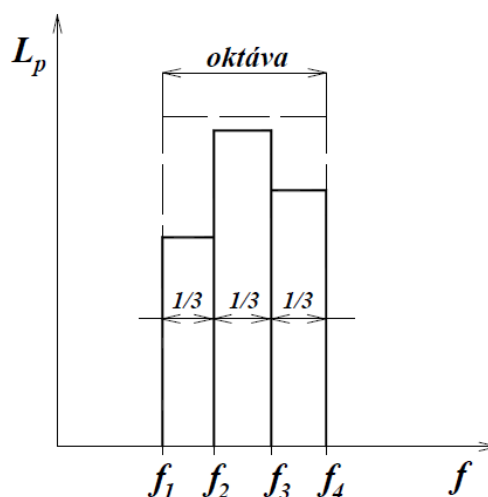
Měření hlučnosti musí proběhnout ve speciální místnosti pro měření hluku, která je navržena tak, aby hluk z vnější strany této místnosti neovlivňoval naměřené hodnoty hluku uvnitř místnosti.

K naměření hodnot se používá $\frac{1}{4}$ " mikrofón typ 4961 od firmy Bruel & Kjaer o vysoké citlivosti 65 mV/Pa , určený k měření frekvencí až 20 kHz – obr. 31. Při měření musíme brát na zřetel, že tento typ mikrofónu musí být namířen přímo na zdroj hluku, který měříme. Čím je více odkloněn, tím je výsledek více zkreslený a nepřesný [10].



Obr. 31: Mikrofón typ 4961

Testování je prováděno metodou měření akustického tlaku L_p [dB(A)] v $1/3$ oktávě z důvodu měření tlaku na co nejmenším frekvenčním rozsahu (není nutný přepočít) – obr. 32.



Obr. 32: Příklad 1/3 oktávy [9]

kde:

$f_1 - f_4$krajní frekvence oktávy [Hz]

$f_2 - f_3$krajní frekvence střední 1/3 oktávy [Hz]

Akustický tlak je definován vztahem [9]:

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0}$$

kde:

pefektivní hodnota akustického tlaku [Pa]

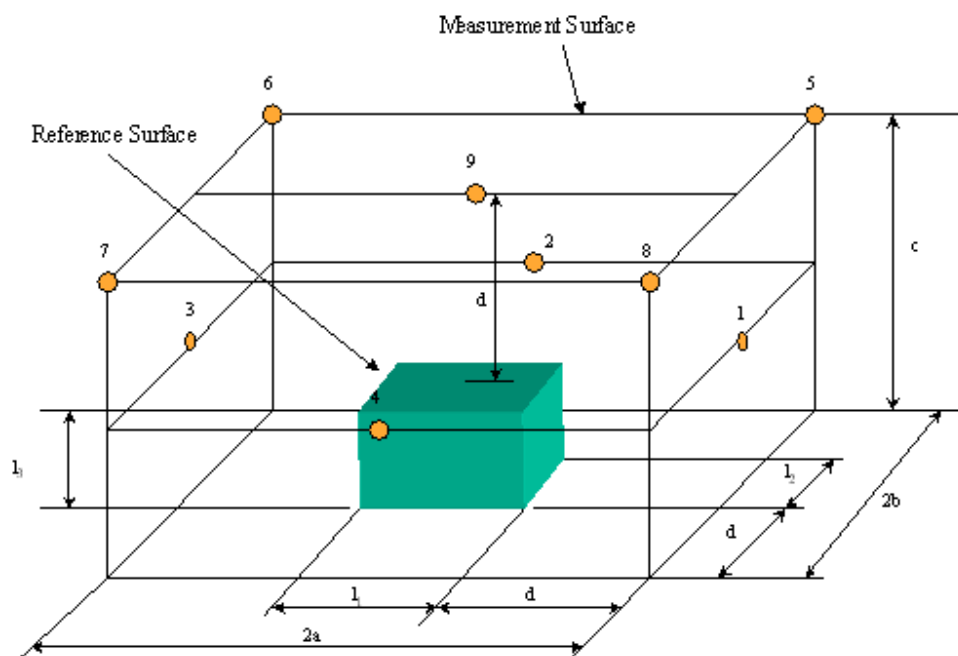
p_0referenční hodnota akustického tlaku (pro vzduch $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa).

Při měření je nutné zajistit, aby veškeré možné zařízení nutné pro měření či chod vývěvy, bylo umístěné mimo měřicí místnost, tak aby neovlivňovalo výsledky měření. To mimo jiné znamená přesunutí primární vývěvy, ovládací jednotky i pracovního vozíku s testovacím zařízením, jelikož tyto zařízení obsahují např. ventilátory – obr. 33.



Obr. 33: Testovací zařízení

Měření je prováděno v 9-ti místech okolo vývěvy v přesně daných vzdálenostech. Je to jedno z nejpřesnějších možných měření právě proto, že je měřeno v tolika bodech a ze všech stran – obr. 34.



Obr. 34: Rozmístění měřených bodů [5]

Mikrofon je při měření nutno ručně přemísťovat a zaznamenávat výsledky z každého z 9-ti měřících bodů. Z časových důvodů je proto nutná spolupráce dvou osob – první přemísťuje mikrofon, druhý zaznamenává naměřené hodnoty. Příklady umístění mikrofonu při měření – obr. 35 a obr. 36.



Obr. 35 a obr. 36: Měření akustického tlaku

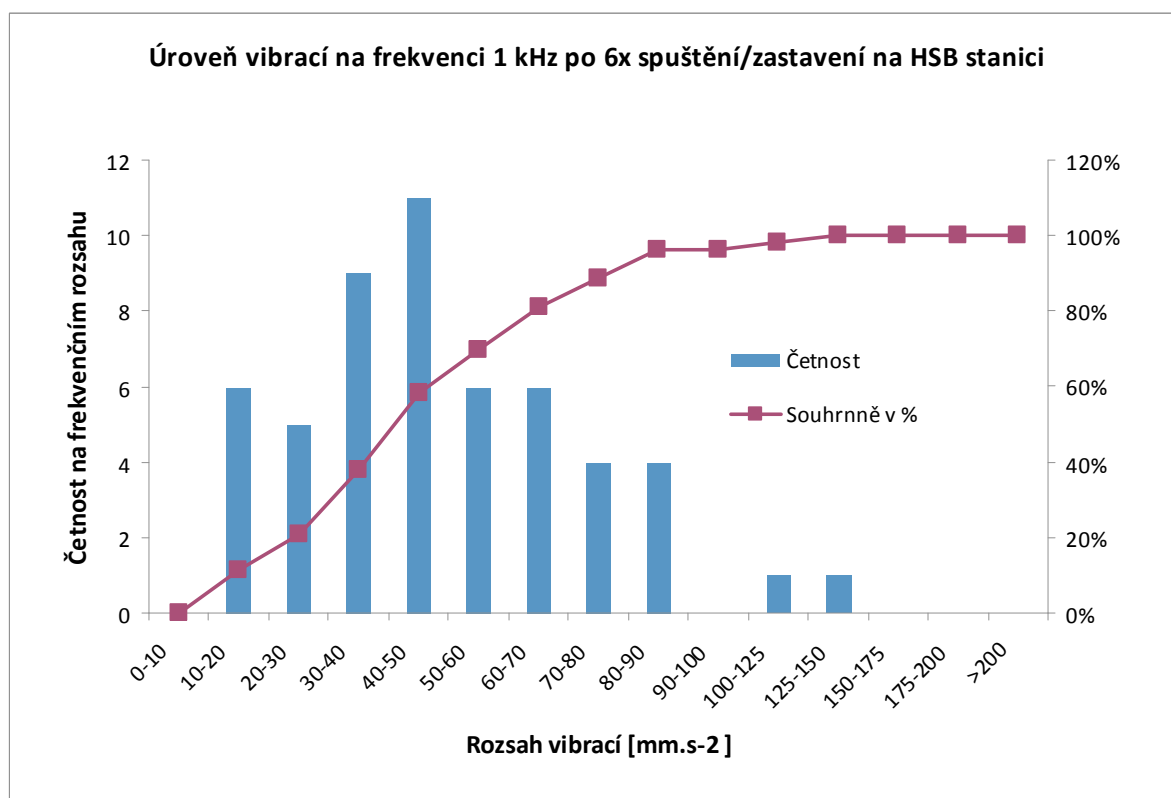
Pro přesné výsledky je nutné rovněž otestovat jen hlučnost (na pozadí) samotné místnosti s vypnutou vývěvou ve všech 9-ti bodech měření.

4 OVĚŘENÍ NAVRŽENÉ METODIKY TESTOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ TESTŮ

4.1 Vysokorychlostní vyvažování

Vysokorychlostní vyvažování je závislé na předchozím nízkorychlostním vyvažování, tzn. že pokud je rotor předvyvážen na co nejmenší nevyváženost, o to snadnější je vyvážit rotor na co nejmenší nevyváženost také při vysokorychlostním vyvažování. Proto se maximální limit nevyváženosti na nízkorychlostním vyvažování snížil na 1/3 původního limitu.

V rámci ověření navržené metodiky vysokorychlostního vyvažování jsme vybrali vzorek 50-ti rotorů ke zjištění, jak je veliká nevyváženost a na kterém místě rotoru. Vývěvy jsou po předvyvážení 6x spuštěny na testovací stanici na nejvyšší možné otáčky ($n = 60000 \text{ min}^{-1}$). Vývěvy jsou spuštěny 6x z důvodu ustálení hodnot nevyváženosti rotoru. Zároveň jsou výsledky zaznamenávány do formuláře, z kterého je posléze vytvořen graf k větší přehlednosti výsledků – obr. 37.



Obr. 37: Měření nevyváženosti rotorů

Důvod tohoto testování je zjistit, jak se pohybují hodnoty nevyváženosti u rotorů a jak jsme schopni je posléze dovyvážit na prostřední vyvažovací rovině. Je to důležité z důvodu nastavení maximálních limitů nevyváženosti při vysokorychlostním vyvažování (maximální limit nevyváženosti pro vývěvu je nastaven na 100 mm.s^{-2} na frekvenci $f = 1000 \text{ Hz}$). Jelikož víme, že hodnota nevyváženosti rotoru je pohyblivá v závislosti na cyklickém spuštění/zastavení vývěvy a dalších aspektech, stanovili jsme hodnotu pro nevyváženost na 75 mm.s^{-2} . Po testování a zapsání výsledků z měření nevyváženosti rotorů jsou proto vývěvy, které nesplňují tyto limity, vyváženy na nižší hodnotu než je maximální limit. Poté jsou spuštěny po dobu 1 hodiny na plnou rychlost pro kontrolu, zda se nevyváženost rotoru nezměnila. Konečná kontrola nevyváženosti se měří na stanici pro měření vibrací.

Vyhodnocení testů: Z výsledků testování vývěv na nevyváženost je patrné, že 96% vývěv splňuje dané interní limity, tzn. maximální nevyváženosti 100 mm.s^{-2} v radiálním směru již před vysokorychlostním vyvažováním. Nicméně, jelikož musíme zajistit tyto hodnoty po celou garantovanou funkční dobu rotoru (20000 cyklů), jsou hodnoty maximální nevyváženosti interně nastaveny na nižší hodnotu. Navíc čím víc je rotor dovyvážen (minimální nevyváženost), tím méně jsou vibrace z vývěvy přenášeny do celého systému.

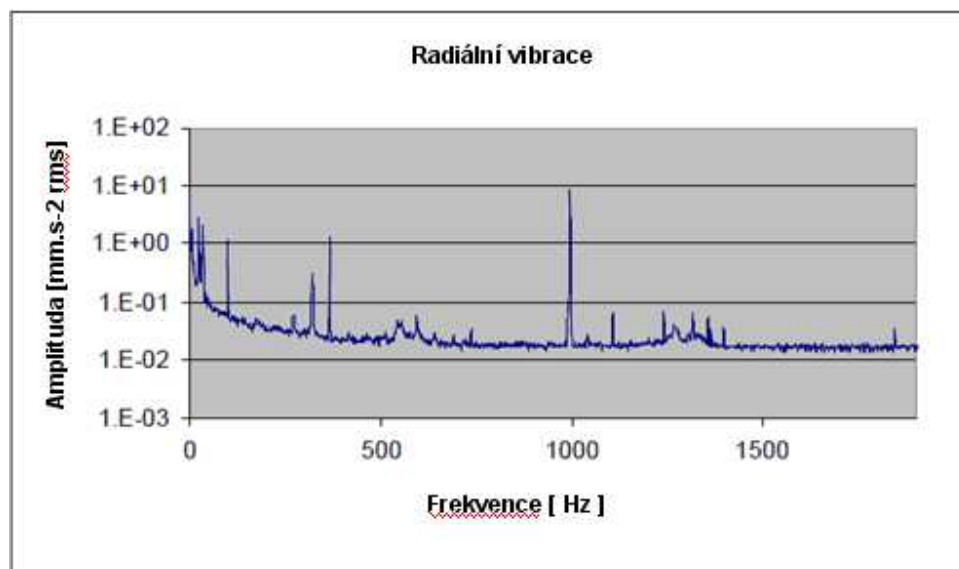
4.2 Testování vibrací

Finální měření vibrací na testovací stanici probíhá po funkčním testu, kdy je podmínka nechat vývěvu ochladit na teplotu okolí (min 1 hod). Je to poslední test společně s měřením velikosti magnetického pole před odesláním vývěvy zákazníkovi. Podstatou testu je spustit vývěvu do maximálních otáček, nechat ustálit po dobu 20 minut a provést první, tzv. studený test, tedy test, kdy není vývěva pod zatížením. Poté se zvýší pracovní zatížení vývěvy připouštěním vzduchu po dobu 30 minut, tzn. že dochází ke zvýšení pracovní teploty vývěvy a je proveden druhý, tzv. horký test. Tento test simuluje možné zatížení vývěvy v procesu. Oba testy jsou vyhodnoceny programem a výsledky uloženy na disk – tab. 4.

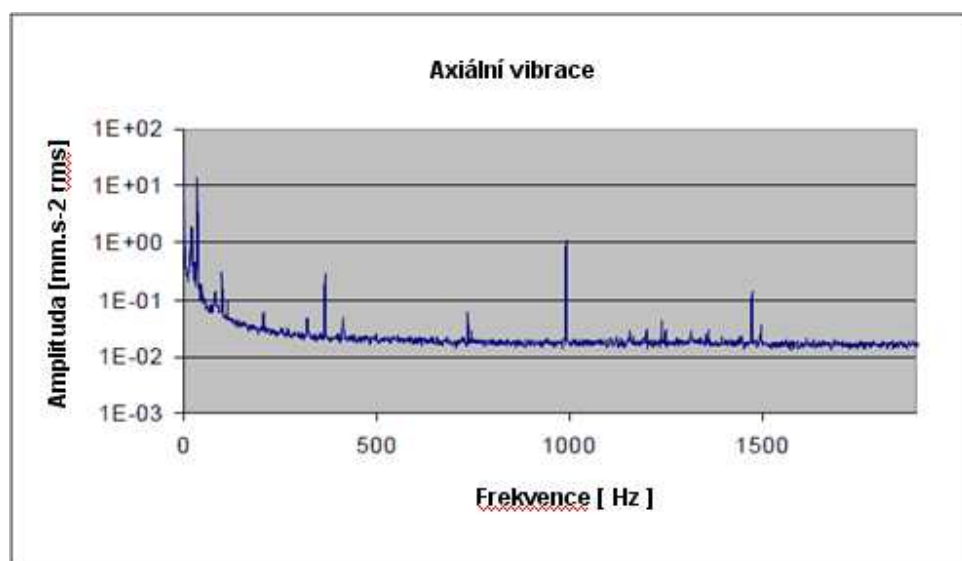
Tab. 4: Příklad zaznamenaných výsledků z testů vibrací v [mm.s⁻²]

Datum testu		Maximální limity		Naměřené hodnoty		
Sériové číslo vývěvy	999999999	determin.	náhodné	determin.	na [Hz]	náhodné
Radiální vibrace	40 - 280Hz	5	5	0.172	206.152	1.198
	280 - 990Hz	7	10	5.955	371.193	6.256
	990 - 1900Hz	100	100	12.723	999.35	13.701
Axiální vibrace	40 - 280Hz	8	12	2.107	87.122	4.415
	280 - 990Hz	4	5	1.394	371.193	2.133
	990 - 1900Hz	100	100	18.410	999.35	19.394

Z těchto naměřených hodnot je poté automaticky vygenerován graf radiálních a axiálních vibrací - obr. 38 a obr. 39. Z těchto grafů lze vyčíst např. neobvyklé špičky (neodpovídá frekvencím dílů vývěvy) nebo kde se pohybují všeobecné typické vibrace vývěvy. Zvýšené radiální vibrace jsou např. specifické pro nevyvážení rotoru, kdežto zvýšené axiální vibrace jsou více specifické pro ložiskové uložení.



Obr. 38: Typické naměřené radiální vibrace



Obr. 39: Typické naměřené axiální vibrace

Vyhodnocení testů: Výsledky testů jsou porovnány s naměřenými hodnotami z vysokorychlostního vyvažování. Porovnáním bylo potvrzeno, že nastavené limity pro nevyváženosti na vysokorychlostním vyvažování jsou nastaveny dostatečně těsné tak, abychom zákazníkovi mohli garantovat navržené maximální limity pro vibrace. Testováním je také ověřena schopnost navržené testovací stanice finálně potvrdit výsledky vibrací před odesláním vývěv k zákazníkovi.

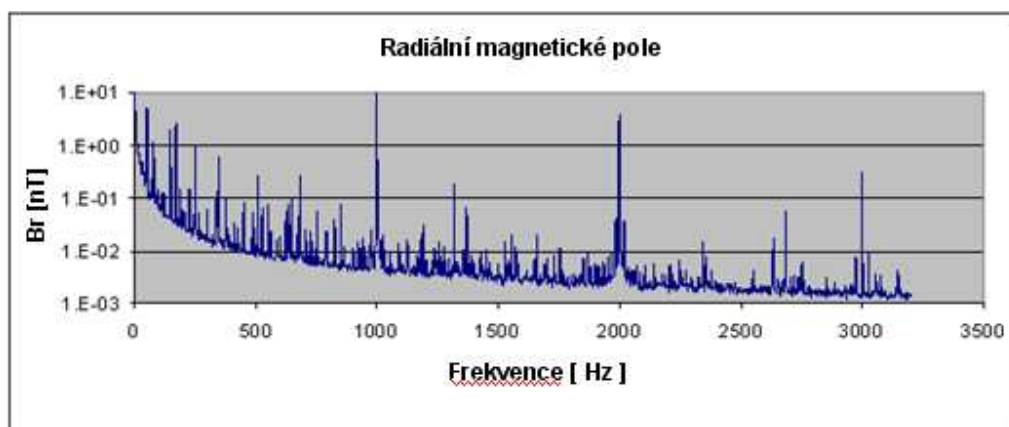
4.3 Testování velikosti magnetického pole

Finální měření magnetického pole probíhá společně s měřením vibrací na testovací stanici, tzn. měření probíhá během studeného a horkého testu. Výsledky měření jsou rovněž zaznamenávány a ukládány na disk – tab. 5.

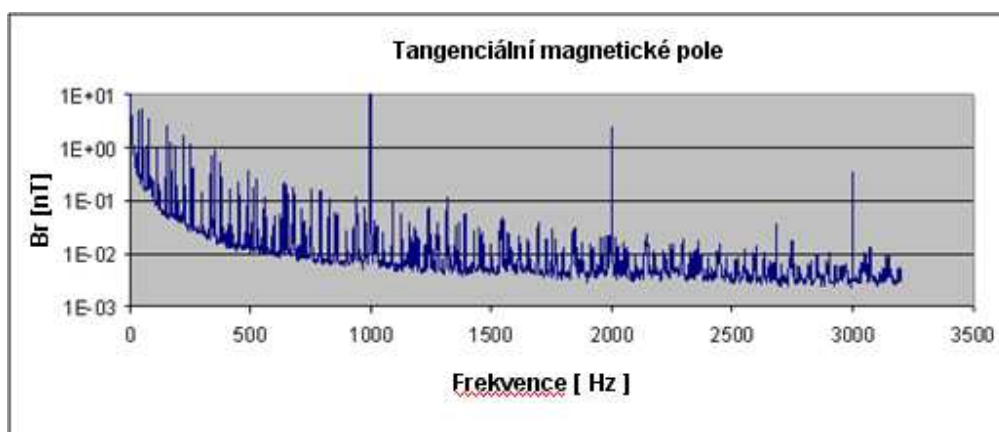
Tab. 5: Příklad zaznamenaných výsledků z měření magnetického pole v [nT]

Datum testu		Maximální limity		Naměřené hodnoty		
Sériové číslo vývěvy	999999999	determin.	náhodné	determin.	na [Hz]	náhodné
<u>Radiální mag. pole celkem</u>	1kHz & 2kHz	45	n/a	33		
<u>Tangenc. mag. pole celkem</u>	1kHz & 2kHz	45	n/a	20		
<u>Radiální mag. pole</u>	1kHz			19.799	998.3	
	2kHz			3.814	1998.6	
<u>Tangenc. mag. pole</u>	1kHz			11.460	998.3	
	2kHz			2.438	1998.6	

Z těchto naměřených hodnot je poté automaticky vygenerován graf celkové velikosti magnetického pole v radiálním a tangenciálním směru - obr. 40 a obr. 41. Výsledky jsou zkombinované pro frekvence $f = (1 \text{ \& } 2) \text{ kHz}$.



Obr. 40: Typické hodnoty velikosti magnetického pole v radiálním směru



Obr. 41: Typické hodnoty velikosti magnetického pole v tangenciálním směru

Vyhodnocení měření: Z výsledků měření je patrné, že kritické frekvence pro velikost magnetického pole jsou 1 kHz & 2 kHz, proto jsou také vyhodnocované výsledky na těchto dvou frekvencích. Porovnáním radiálních a tangenciálních frekvencí bylo také zjištěno, že velikost magnetického pole v radiálním směru je cca 1,5 až 2x větší než ve směru tangenciálním. Vzhledem ke skutečnosti, že standardní vývěvy nEXT240D mají velikost magnetického pole více než 50 nT ve vzdálenosti 200 mm od osy vývěvy, můžeme zákazníkovi zaručit požadované maximální hodnoty magnetického pole.

4.4 Testování hlučnosti vývěv

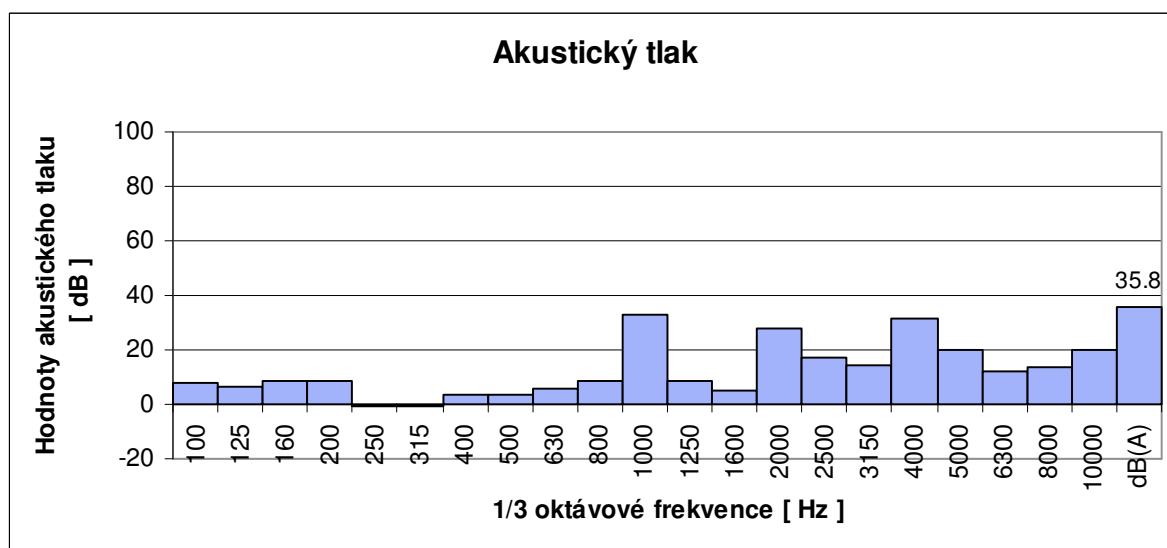
K testování jsou náhodně vybrány 4 vývěvy, které prošly standardními testovacími procedurami (vysokorychlostní vyvažování, funkční test, finální měření vibrací a velikosti magnetického pole). Limit pro hlučnost vývěvy je 45 dB (A) \pm 3 dB, kde A znamená váhový filtr, který koriguje naměřené hodnoty akustického tlaku podle charakteristiky lidského ucha (např. na frekvenci $f = 100$ Hz má útlum -19,1 dB, na $f = 1000$ Hz útlum 0 dB, na $f = 10$ kHz útlum -2,5 dB) [11]. Dnešní hlukoměry jsou již těmito filtry standardně vybavené a tak zaznamenané výsledky již není nutné přepočítávat.

Měření se provádí v 9-ti bodech při vývěvě spuštěné na plné otáčky tj. $n = 60000 \text{ min}^{-1}$ – tab. 6. Pro přesnější výsledky se měří v 9-ti bodech také hlučnost okolního prostředí v měřící místnosti, která je poté přes koeficienty zohledňována v konečném výsledku měření. Jelikož změna hlučnosti prostředí je zanedbatelná ($\pm 0,5$ dB), měření je provedeno jen jednou a výsledky měření jsou použity pro všechny 4 měřené vývěvy.

Tab. 6: Příklad naměřených hodnot v 9-ti bodech v dB (A)

	Naměřené hodnoty hluku									
Frekvence	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Průměr
100	15.64	13.22	15.10	11.95	9.90	9.61	10.68	10.15	12.08	12.58
125	8.39	10.12	7.36	9.94	10.31	9.15	9.45	8.52	9.70	9.31
160	6.15	10.71	10.28	9.73	11.72	9.57	7.37	8.22	15.02	10.62
200	3.42	3.29	6.82	2.87	3.65	5.01	3.62	2.92	3.79	4.12
250	0.22	0.41	-0.11	0.51	-0.78	-1.09	-1.32	0.02	0.12	-0.18
315	1.90	2.07	2.08	2.33	0.33	1.24	1.66	0.70	2.29	1.67
400	10.22	7.07	8.91	7.56	7.72	6.44	5.45	5.60	9.71	7.93
500	3.05	3.12	3.29	3.39	3.06	2.28	2.67	3.86	9.36	4.44
630	5.17	5.31	6.93	5.95	5.14	4.22	4.05	6.81	10.59	6.51
800	12.24	10.97	11.00	10.01	11.79	8.11	11.16	11.36	10.17	10.89
1000	36.90	36.51	36.31	35.16	33.84	32.28	37.05	33.05	28.89	35.07
1250	15.33	15.15	14.08	14.54	14.08	12.65	15.35	13.52	13.20	14.30
1600	11.59	12.15	14.67	9.69	8.67	10.51	9.39	11.90	14.75	11.98
2000	35.21	36.34	40.01	30.22	28.20	33.87	29.79	35.38	37.57	35.50
2500	15.99	16.62	20.02	18.07	15.04	14.31	13.30	18.06	17.23	16.96
3150	17.63	18.21	20.91	21.75	19.76	21.66	20.44	17.30	17.12	19.77
4000	26.67	38.24	35.38	34.48	25.97	31.49	27.18	26.96	21.58	32.59
5000	22.91	23.05	24.22	22.59	17.82	18.04	20.98	17.39	26.44	22.47
6300	16.05	21.82	13.84	20.25	13.31	12.74	13.09	15.04	16.27	17.06
8000	14.46	13.30	14.69	19.96	14.97	18.39	11.71	15.35	12.76	15.85
10000	25.82	27.92	35.08	29.37	24.64	24.76	16.63	23.60	21.97	28.32
L'pA	39.80	42.22	43.36	39.40	36.14	37.95	38.44	38.14	38.78	39.90

Z naměřených výsledků (při spuštěné i zastavené vývěvě) se vygenerují výsledné grafy, které ukazují, na jakých frekvencích a jak hlučná vývěva je i celkovou hlučnost vývěvy.– obr. 42.



Obr. 42: Příklad naměřených hodnot akustického tlaku

Vyhodnocení měření: Z grafů je zřejmé, že vývěvy mají nejvyšší hladinu akustického tlaku na frekvenci plných otáček rotoru a jejich násobcích – tab. 7. Celková hladina akustického tlaku nepřesahuje ani u jedné testované vývěvy maximální limit $45 \text{ dB (A)} \pm 3 \text{ dB}$, tudíž je možno označit vývěvy jako vyhovující po stránce limitů pro jejich hlučnost.

Tab. 7: Nejvyšší a celkový naměřený akustický tlak na vzorku vývěv v [dB (A)]

Sériové číslo	1kHz	2kHz	4kHz	Celkový akustický tlak
000000001	33.14	27.61	31.54	35.81
000000002	25.46	33.52	33.97	38.08
000000003	38.19	29.84	26.99	38.36
000000004	32.32	32.57	28.23	35.89

5 CELKOVÉ ZHODNOCENÍ

Navržené konstrukční změny jsou kritické pro zlepšení funkčních parametrů vývěvy z hlediska vibrací a vlivu magnetického pole, stejně jako ověření, že turbomolekulární vývěva s navrženými konstrukčními změnami odpovídá všem požadovaným parametrům.

Změnou konstrukce CMSD bylo docíleno snížení vibrací v axiálním směru na nízkých frekvencích. Negativním dopadem je snížení tuhosti v radiálním i axiálním směru. V důsledku toho bylo nutné otestovat a ověřit vliv této změny na všechny funkční parametry vývěvy a to i dlouhodobým cyklickým testováním. Stejně tak byly testovány různé materiály O-kroužku, z nichž byl vybrán nejvíce vyhovující materiál pro snížení vibrací na požadovaných frekvencích. Obě navržené změny jsou zaimplementovány a konstrukce CMSD chráněna patentem. Zavedením a použitím LCMSD nejsou ovlivněny náklady na výrobu ani čas montáže.

Sestavením magnetů jsme schopni zákazníkovi zaručit maximální velikost magnetického pole v určité vzdálenosti od osy vývěvy tak, aby tento parametr neovlivňoval výsledný obraz v elektronových mikroskopech. Procentuální úspěšnost sestavení magnetů (75%) je vyhovující vzhledem k náročnému vývoji tohoto procesu, nicméně je zde prostor k dalšímu zlepšení procesu sestavování tak, aby došlo k minimalizaci času potřebného k tomuto procesnímu kroku stejně jako k minimalizaci nákladů na zmetky.

Zavedením vysokorychlostního vyvažování a úpravou limitů pro nízkorychlostní vyvažování bylo docíleno vyšší vyváženosti rotoru a tím také nižšího přenosu vibrací do systému. Nevýhodou je prodloužení celkového procesního času v průměru o 2,5 hodiny v závislosti na původní nevyváženosti rotoru. Celkově lze říci, že od vysokorychlostního vyvažování jsme očekávali větší přínos na snížení radiálních vibrací i rychlejší proces vyvažování. Nicméně zůstává nezbytnou součástí procesu i z důvodu ustálení hodnot nevyváženosti po opakovaném spuštění na plnou rychlost.

Pro ověření zlepšených parametrů vývěvy byla zkonstruována testovací stanice, schopná měřit vibrace v axiálním a radiálním směru zároveň s měřením velikosti magnetického pole 200 mm od osy vývěvy. Testováním vzorků a vyhodnocením jejich výsledků byla ověřena funkčnost stanice pro finální měření funkčních parametrů. Možným zjednodušením procesu měření do budoucna může být odstranění měření velikosti magnetického pole v tangenciálním směru (odstraní se náklady na kalibraci zařízení, údržbu). Je však nutno měřením ověřit, že velikost magnetického pole v radiálním směru je vždy větší.

Ostatní parametry vývěvy jako čerpací rychlost, čas k dosažení maximálních otáček a dalších byly otestovány na standardní testovací stanici a bylo ověřeno, že splňují dané limity pro tento typ turbomolekulárních vývěv.

Z důvodu použití těchto vývěv hlavně v laboratorních systémech u zákazníků, jsme provedli testy na hlučnost. Měřením akustického tlaku bylo ověřeno, že všechny čtyři testované vývěvy jsou v limitu 45 dB (A) s průměrným výsledkem 37 dB (A). Nicméně nebyl otestován dostatečně velký vzorek vývěv a pro ověření, že i po změně konstrukce vývěvy splňují maximální hodnoty akustického tlaku, je nutno v budoucnu opakovat toto měření na větším počtu vzorků. Jen tím můžeme zákazníkům garantovat předepsané maximální hodnoty akustického tlaku.

Souhrn výsledků práce:

- zavedené a ověřené konstrukční změny pro snížení přenosu vibrací do systémů elektronových mikroskopů
- zavedený a ověřený proces na měření magnetického pole vývěvy
- celkový čas výroby prodloužený průměrně o 4 hodiny oproti nEXT240D
- garance maximálních dovolených limitů pro vibrace a magnetické pole vývěvy uvedených v tab. 3 a tab. 4.
- ověřené ostatní parametry vývěvy

ZÁVĚR

Zlepšení funkčních parametrů u těchto typů turbomolekulárních vývěv znamenal stovky hodin strávených na výpočtech, výkresech, testování a ověření parametrů navržených změn v praxi. Inovační návrhy změn jsou prací celého našeho týmu vývojových pracovníků, nicméně na zavedení do provozu v Lutíně a ověření jejich funkčních parametrů jsem pracoval s podporou týmu z Anglie půl roku k dosažení společného cíle – zavedení turbomolekulární vývěvy se zlepšenými funkčními parametry pro speciální aplikace vyžadující minimální přenos vibrací a velikost magnetického pole.

Zavedením inovačních změn a přidavným testováním zaručující zlepšené parametry vývěvy vznikly náklady na vyrobení testovacích stanic a došlo také k prodloužení celkového času výroby vývěvy. Tyto dodatečné náklady jsou vyváženy dodávkami nízkovibračních vývěv zcela novým zákazníkům a doplněním chybějícího sortimentu firmy Edwards v aplikacích elektronových mikroskopů. Neméně důležitou součástí je inovační potenciál a možnosti dalšího zlepšení funkčních parametrů. S tím souvisí také příslib nových zakázek do budoucna pro další specializovaná pracoviště.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. HARRIS, N. Modern vacuum practice. Berkshire: McGraw-Hill Publishing Company, 1989, 315 p., ISBN0-07-707099-2.
2. Fyzikální ústav Akademie věd ČR. Popularizace. FZU.cz [online]. © 2008-2010 [cit.2012-03-12]. Dostupné z: <http://www.fzu.cz/popularizace/elektronovym-mikroskopem-do-nitra-materialu-aneb-jak-vypada-jejich-struktura>
3. Transmission electron microscopy. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Wikimedia Foundation, last modified on 25.3.2012 [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Transmission_electron_microscopy
4. Scanning electron microscopy. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Wikimedia Foundation, last modified on 20.3.2012 [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope
5. Firemní literatura Edwards
6. Update international. Vibration Book. Update-intl.com [online]. © 2005 [cit. 2012-03-21]. Dostupné z: <http://www.update-intl.com/VibrationBook.htm>
7. Brewster, Barrie a Chan-Cheong Siew. Vacuum pump. US2010215475. United Kingdom. 2010-08-26. Dostupné z: http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/inpadoc?CC=US&KC=A1&ND=3&FT=D&DB=EPODOC&NR=2010215475A1&bcId=2&return=true&date=20100826&locale=en_EP
8. PCB Piezotronics. Model 352C34. Pcb.com [online]. © 2012 [cit. 2012-04-19]. Dostupné z: http://www.pcb.com/spec_sheet.asp?model=352C34&item_id=9450
9. UTB Zlín. Decibellové veličiny v akustice. Ufmi.ft.utb.cz [online]. © 2009 [cit. 2012-04-23]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_03.pdf
10. Bruel & Kjaer. New microphone technology. Sem.org [online]. © 2010 [cit. 2012-04-16]. Dostupné z: http://www.sem.org/PDF/New_microphone_technology.pdf
11. Analysis precision. Slovník pojmů. Anylysisprecision.cz [online]. [cit. 2012-04-30]. Dostupné z: <http://www.analysisprecision.cz/slovníkpojmu.html#7>
12. PAZDERA, A. Měření, sestavení a testování magnetů pro nEXT240(i)DL. Edwards s.r.o. Lutín, 2012

SEZNAM PŘÍLOH